

# ANALISA UMUR KELELAHAN STRUKTUR SEPINGGAN Q PLATFORM YANG MEMILIKI RETAK AWAL *SEMI-ELLIPTICAL* DENGAN MENGGUNAKAN METODE *LINEAR ELASTIC FRACTURE MECHANICS*

Muhammad Fauzi(1), Nur Syahroni(2), dan Handyanu(3)

<sup>(1)</sup>Mahasiswa Teknik Kelautan ITS · <sup>(2)(3)</sup>Staf Pengajar Teknik Kelautan ITS

Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan,

Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: [nsyahroni@oe.its.ac.id](mailto:nsyahroni@oe.its.ac.id) , [handyanu@oe.its.ac.id](mailto:handyanu@oe.its.ac.id)

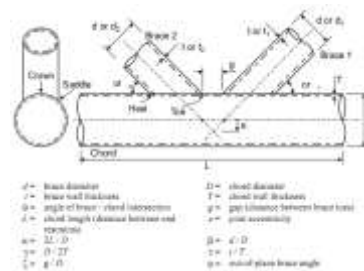
**Abstrak**—*Fatigue* adalah salah satu masalah yang dapat dijumpai dalam operasi struktur bangunan lepas pantai. *Fatigue* pada struktur terjadi pada sambungan terkritik struktur dan mengalami perambatan akibat beban siklis hingga terjadi kegagalan struktur. Sambungan tubular terkritik ditentukan berdasarkan nilai *fatigue damage* tertinggi yang terjadi pada *multiplanar tubular joint* 502. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan pendekatan *fracture mechanics*. Pemodelan retak awal dilakukan pada titik *hotspot* dimana terjadi tegangan terbesar. Analisis ini dimulai dengan menentukan *stress intensity factor* (SIF) dan laju perambatan retak yang terjadi pada titik *hotspot* sehingga umur kelelahan struktur dapat diprediksi. Hasil analisis yang didapat yaitu besarnya nilai SIF dengan pembebanan maksimum adalah  $6,86 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  sedangkan besarnya nilai SIF dengan pembebanan minimum adalah  $6,02 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Laju perambatan retak yang terjadi pada *tubular joint* 502 sebesar  $1,59 \times 10^{-10} \text{ in/cycle}$ . Perhitungan umur kelelahan struktur menggunakan metode *fracture mechanics* adalah  $1,12 \times 10^8 \text{ cycles}$  (27 tahun).

**Kata kunci**—*fatigue damage, fracture mechanics, hotspot, laju perambatan retak, stress intensity factor.*

## I. PENDAHULUAN

*Fatigue* adalah salah satu masalah yang dapat dijumpai dalam perancangan struktur bangunan lepas pantai. Salah satunya adalah struktur *jacket platform*, dimana struktur tersebut terdiri dari beberapa member berbentuk silinder yang biasanya disebut *tubular*.

Terdapat member tubular bertindak sebagai member utama yang disebut *chord* dan member tubular bertindak sebagai cabang yang disebut *brace*. Sambungan tiap member tubular biasanya disebut *tubular joint*. Dalam sambungan tubular juga terdapat istilah-istilah atau notasi-notasi yang perlu diketahui seperti pada Gambar 1.



Gambar 1 Notasi Geometrik Tubular Joint

*Fatigue* pada struktur terjadi akibat dari pembebanan yang memicu munculnya retak pada salah satu bagian struktur yang kemudian menjalar secara global sehingga struktur mengalami kegagalan. Beban yang diterima bangunan laut didominasi oleh beban gelombang sehingga menyebabkan bangunan laut lebih cenderung mengalami kelelahan, selain itu faktor operasi pada tingkat tertentu menambah beban siklis sehingga struktur menjadi bertambah kritis.[1]

Salah satu hal yang sangat penting dalam analisa suatu struktur bangunan lepas pantai adalah melakukan analisa atas kemampuan suatu struktur tersebut memenuhi tujuan desain yang telah ditetapkan, termasuk disini adalah bahwa struktur tidak akan mengalami kegagalan dalam berbagai kondisi kerja.[2]

Penelitian ini merupakan studi kasus pada struktur Sepinggian Q Platform milik Chevron

Indonesia Company yang beroperasi di “Sepinggan Field” Selat Makassar. Platform ini memiliki 4 kaki (*tetrapod*) berfungsi sebagai *Living Quarter* atau tempat tinggal engineer. Platform didesain untuk masa operasi selama 30 tahun. Platform Sepinggan Q berdiri pada kedalaman 132.87 ft.



Gambar 2 Sepinggan Q Platform

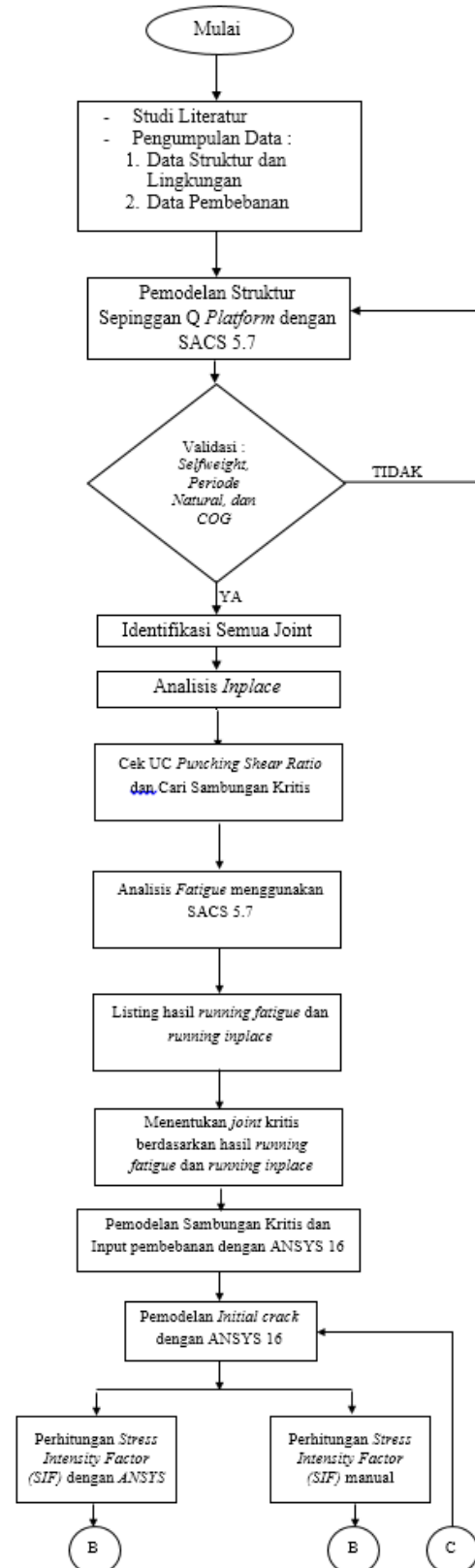
Platform Sepinggan Q (lihat Gambar 2) tersusun atas 2 level utama, yakni *Main Deck* pada ketinggian 72'-11 <sup>11</sup>/<sub>16</sub>" dan *Cellar Deck* pada ketinggian 51'-9" di atas MSL (Mean Sea Level) struktur dengan tambahan *mezzanine deck*, *sub-cellar deck* dan *quarter deck* di atas *main deck*. Setiap *deck* ditopang oleh 4 kaki jacket yang terpancang hingga mencapai *seabed* pada kedalaman 132'-10 <sup>3</sup>/<sub>8</sub>" dibawah MSL struktur. Struktur *jacket* memiliki diameter 40" dan ungrouted pile berdiameter 36" dengan kedalaman penetrasi sebesar 285 ft. Analisis dalam tugas akhir ini bertujuan untuk:

1. Menghitung *Stress Intensity Factor* (SIF) tubular joint terkritis yang memiliki retak awal berbentuk semi-elliptical
2. Menghitung *Stress Intensity Factor* (SIF) tubular joint terkritis yang memiliki retak awal berbentuk semi-elliptical
3. Menghitung umur kelelahan *tubular joint* terkritis yang memiliki retak awal berbentuk semi-elliptical

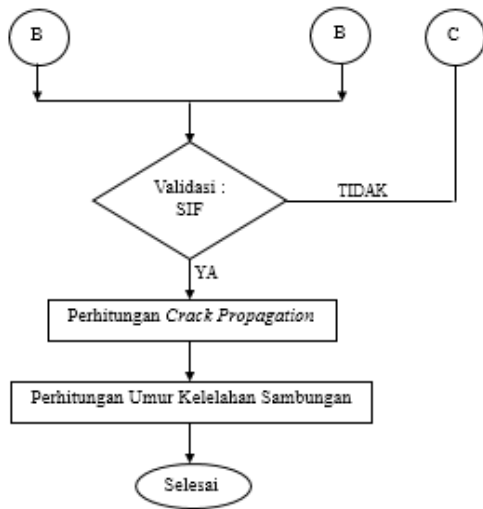
Seluruh analisis dalam penelitian ini dibantu menggunakan program elemen hingga yakni, SACS 5.7 dan ANSYS 16.0

## II. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan dalam beberapa tahap yang tersusun pada Gambar 3 berikut:



Gambar 3 Diagram Alir Penelitian



**Gambar 3** Diagram Alir Penelitian (lanjutan)

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Pemodelan Struktur Global

Pemodelan struktur Sepinggian Q menggunakan *software* SACS 5.7. Gambar 4 ini pemodelan struktur disesuaikan dengan data struktur dan data lingkungan.



**Gambar 4** Pemodelan Struktur Sepinggian Q Platform

#### B. Validasi Model

Validasi model dilakukan dengan membandingkan berat struktur, periode natural struktur dan letak titik berat (COG) pada model dengan struktur asli. Berikut hasil validasi disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2:

**Tabel 1** Validasi Berat Struktur dan Periode Natural

Validasi	Model	Report	Selisih (%)
Selfweight (kips)	3343.06	3458.09	3.33%
Periode Natural (s)	1.52	1.55	1.94%

**Tabel 2** Validasi COG Struktur

	x	y	z
<b>REPORT</b>	0.080	2.930	2.070
<b>MODEL</b>	0.078	2.927	2.071
<b>ERROR (%)</b>	2.500	0.102	0.048

#### C. Penentuan Sambungan Kritis

Sambungan kritis diperoleh dari nilai *fatigue damage* tertinggi hasil analisis *fatigue* dan *input* pembebanan diambil dari analisis *inplace*. Penentuan *joint* terkritis dapat dilihat pada Tabel 3.

**Tabel 3** Penentuan *Joint* Tekritis

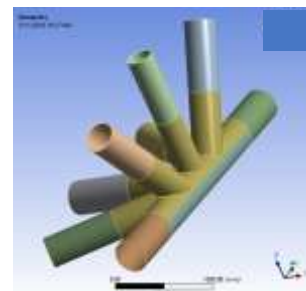
JOINT	ANALISIS INPLACE	ANALISIS FATIGUE	
	UNITY CHECK	SERVICE LIFE (YEARS)	FATIGUE DAMAGE
604	1.389	130.9537	0.3055
601	1.254	1157.828	0.0345
603	1.246	1122.742	0.0356
602	1.137	118.1484	0.3386
<b>502</b>	<b>0.903</b>	<b>18.80965</b>	<b>2.1266</b>
504	0.873	32.80037	1.2195
107L	0.834	301.4156	0.1327
105L	0.821	417.5374	0.0958
102	0.792	10691.23	0.0037
104	0.789	13709.56	0.0029

#### D. Pemodelan Sambungan Kritis

Dari hasil analisis *fatigue* didapatkan bahwa *joint* kritis terletak pada 502, sehingga dilakukan pemodelan *solid element* dengan data geometri seperti pada Tabel 4 dan Gambar 5.

**Tabel 4** Geometri *Multipplanar Tubular Joint* 502

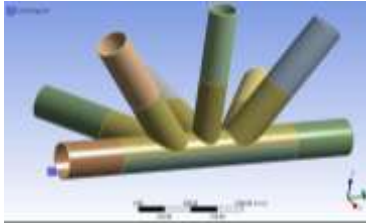
Member	Member Type	Length	O.D	W.T
		m	in	in
503L-502	Chord	7.42	14	0.375
502-507L	Chord	7.42	14	0.375
524-502	Brace	2.68	12.75	0.375
502-503	Brace	10.50	12.75	0.375
502 - 603L	Brace	11.04	12.75	0.375
502 - 602	Brace	9.06	10.75	0.375
521-502	Brace	2.17	14	0.375
502-607L	Brace	11.04	12.75	0.375



**Gambar 5** Pemodelan *Multipplanar Tubular Joint* 502

#### E. Kondisi Batas dan Pembebanan

Dalam pemodelan secara detail, model diberikan kondisi batas berupa *fixed support* (lihat Gambar 6) dan pembebanan diperoleh dari hasil analisis *inplace* pada kondisi pembebanan minimum dan maksimum (lihat Tabel 5 dan 6).



Gambar 6 Fixed Support

Tabel 5 Input Pembebanan Minimum

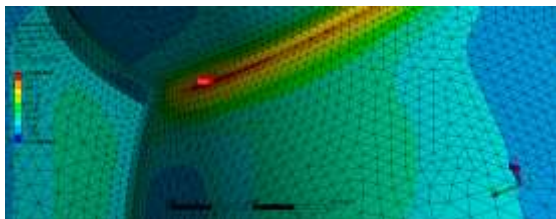
Member	Fx kN	Fy kN	Fz kN	Mx kN.m	My kN.m	Mz kN.m
502 - 603I	104.108	-1.094	0.835	-14.009	-15.539	112.957
502 - 602	-35.168	-0.086	-2.413	0.324	264.265	-2.178
502-607L	-44.671	1.393	-0.288	0.611	-32.132	-184.515
524-502	-6.554	0.642	-6.660	30.164	-355.799	16.372
502-503	8.555	1.282	-0.234	30.204	59.946	-75.473
521-502	0.028	0.129	-7.296	-75.684	-426.351	10.024
502-507L	35.775	0.916	0.970	47.440	-123.856	-144.385

Tabel 6 Input Pembebanan Maksimum

Member	Fx kN	Fy kN	Fz kN	Mx kN.m	My kN.m	Mz kN.m
502 - 603I	123.847	-1.182	0.330	-11.764	45.342	129.592
502 - 602	-36.837	-0.121	-2.696	0.712	303.648	0.253
502-607L	-60.313	1.462	-0.791	-0.324	29.428	-200.122
524-502	-0.853	0.855	-0.770	17.332	-419.336	-67.912
502-503	8.006	1.173	-0.156	35.162	58.852	-71.323
521-502	-0.189	0.139	-8.517	-89.758	-502.229	11.171
502-507L	55.302	0.868	1.069	50.705	-135.352	-134.539

#### F. Analisis Meshing Sensitivity

Analisis *Meshing Sensitivity* dilakukan untuk mengukur keakuratan *output* dari pemodelan ANSYS akibat dari penggunaan jumlah elemen. Nilai pembebanan pada analisis ini sama namun penggunaan jumlah elemen divariasikan. Pada model sambungan tubular, jumlah elemen yang digunakan bervariasi dengan nilai pembebanan yang sama. Hasil analisis ini dapat disajikan dalam Gambar 7 dan Tabel 7 berikut.

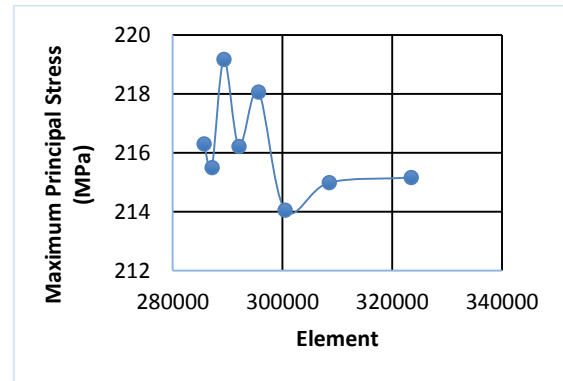


Gambar 7 Hasil analisis meshing sentivity

Tabel 7 Tabulasi Hasil Analisis *Meshing Sensitivity*

Element Size (mm)	Element	Maximum Principal Stress (MPa)
9	323425	215.16
10	308528	214.99
11	300461	214.06
12	295626	218.07
13	292069	216.22
14	289336	219.17
15	287137	215.50
16	285710	216.30

Dari Tabel 7, dilakukan *ploting* sehingga hasilnya seperti pada Grafik 1.

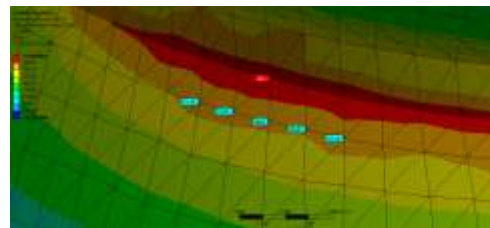


Grafik 1 Analisis *Meshing Sensitivity*

Dari grafik 1 didapatkan tegangan yang stabil sebesar 214.99 MPa pada ukuran elemen 10 mm dengan jumlah elemen sebanyak 308528 elemen.

#### G. Penentuan Titik Retak

Dikarenakan pemodelan *crack* tidak dapat dilakukan pada titik tegangan maksimum yang berada tepat di *weld toe*, sehingga dipilih 5 titik terdekat dari *weld toe* sebagai titik tinjauan *crack* seperti pada Gambar 8.



Gambar 8 Node yang ditinjau

#### H. Pemodelan surface crack

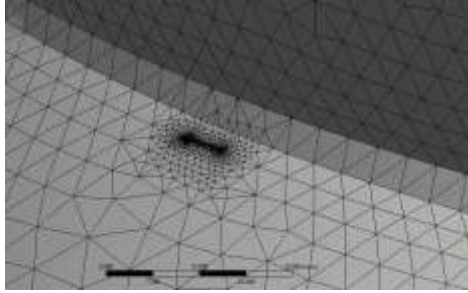
Setelah menentukan titik retak yang ditinjau, pemodelan *crack* dilakukan berdasarkan data sebagai berikut.

$$a \text{ (crack depth)} = 0.5 \text{ mm (aturan ABS)}$$

$$a/2c = 0.15$$



Sehingga didapatkan nilai *crack length* (2c) sebesar 3.33 mm. Hasil *meshing surface crack* dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9 Meshing Surface Crack

#### I. Validasi SIF

Kelima titik retak dilakukan validasi SIF antara analitis dan numeric saat kondisi pembebanan minimum dan maksimum. Hasil validasi dapat dilihat pada tabel 8 dan tabel 9.

Tabel 8 Validasi SIF kondisi pembebanan Minimum

Titik	K <sub>I</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )		Error (%)
	Manual	ANSYS	
1	5.797	5.763	0.590
2	5.751	5.890	2.428
3	6.045	5.837	3.439
4	6.025	5.830	3.245
5	6.361	5.819	8.522

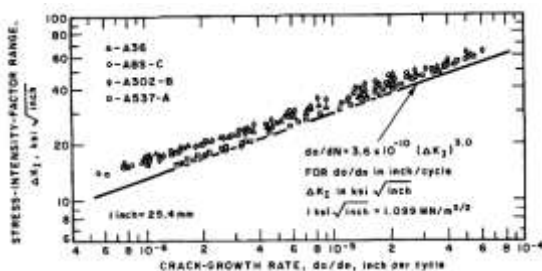
Tabel 9 Validasi SIF kondisi pembebanan maksimum

Titik	K <sub>I</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )		Error (%)
	Manual	ANSYS	
1	7.299	6.737	7.704
2	7.229	6.738	6.800
3	7.035	6.677	5.088
4	6.862	6.650	3.090
5	7.363	6.664	9.499

Titik 4 dipilih dikarenakan memiliki tingkat *error* < 5% saat kondisi pembebanan minimum dan maksimum.

#### J. Perhitungan *crack propagation*

Perhitungan *crack propagation* dilakukan menggunakan persamaan pada Gambar 10.



Gambar 10 Perhitungan Crack Propagation

Besarnya laju perambatan retak yang terjadi pada *multiplanar tubular joint* 502 adalah 1,59E-10 in/cycles.

#### K. Perhitungan Kedalaman Kritis

Untuk mengetahui kedalaman retak maksimal yang mampu ditahan material dihitung menggunakan persamaan (1): [3]

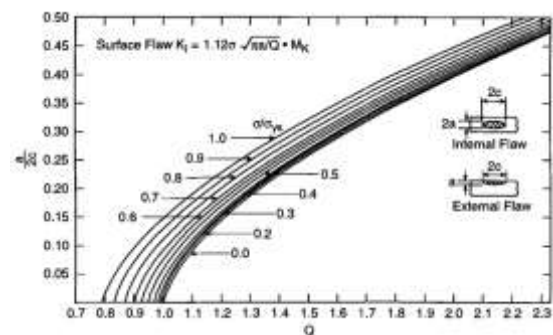
$$a_{cr} = \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{max} \sqrt{\pi/Q}} \right)^2 \quad (1)$$

Dengan nilai

$$K_{IC} = 165.8 \text{ ksi} \cdot \sqrt{\text{in}} = 185.19 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

$$\sigma_{max} = 214.99 \text{ MPa} = 31 \text{ ksi}$$

$$Q = 1.22 \text{ (didapat dari Grafik 2)}$$



Grafik 2 Perhitungan SIF

Didapatkan,

$$a_{cr} = \left( \frac{165.8}{31 \sqrt{3.14/1.22}} \right)^2$$

$$a_{cr} = 8.756 \text{ in}$$

Sehingga apabila retak mencapai kedalaman 8.756 in struktur tersebut akan runtuh. Namun, untuk tubular ini hanya memiliki ketebalan 0.375 in sehingga akan dihitung sampai kedalaman tersebut.

#### L. Perhitungan SIF & umur kelelahan

Perhitungan SIF dilakukan secara manual dan dengan bantuan proram ANSYS. Dalam perhitungan manual menggunakan persamaan (2):

$$\Delta K = 1.12 \Delta \sigma \sqrt{\pi \frac{a_{avg}}{Q}} \cdot M_K \quad (2)$$

Setelah mendapatkan parameter  $\Delta K$  / SIF dilakukan perhitungan umur kelelahan dengan persamaan (3):

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{3.6 \cdot 10^{-10} (\Delta K)^3} \quad (3)$$

Perhitungan umur kelelahan dapat dilihat pada tabel 10.

**Tabel 10** Perhitungan Umur Kelelahan Struktur Sepinggang Q Platfrom

$a_0$ (in)	$a_i$ (in)	$a_{avg}$ (in)	AK <sub>i</sub> (ksi.in <sup>3/2</sup> )		ANALYTICAL			NUMERICAL		
			ANALYTICAL	NUMERICAL	AN	YN	N(tahun)	AN	YN	N(tahun)
0.0197	0.0394	0.0295	1.081	1.364	43251266	43251266	10.56	21570905	21570905	5.27
0.0394	0.0591	0.0492	1.396	1.640	20101372	63352638	15.47	12401127	33972031	8.29
0.0591	0.0787	0.0689	1.652	1.861	12134829	75487467	18.43	8485251	42457282	10.37
0.0787	0.0984	0.0886	1.873	2.049	8323710	83811177	20.46	6352630	48809912	11.92
0.0984	0.1181	0.1083	2.071	2.029	6160156	89971333	21.97	6546176	55356088	13.52
0.1181	0.1378	0.1280	2.251	2.102	4794747	94766079	23.14	5884708	61240796	14.95
0.1378	0.1575	0.1476	2.418	2.137	3868511	98634590	24.08	5602995	66843791	16.32
0.1575	0.1772	0.1673	2.574	2.128	3206323	101849014	24.87	5674387	72518177	17.71
0.1772	0.1969	0.1870	2.721	2.167	2713628	104554542	25.53	5373498	77891675	19.02
0.1969	0.2165	0.2067	3.037	2.211	1952960	106307501	26.01	5059034	82950709	20.25
0.2165	0.2362	0.2264	3.366	2.371	1433229	107940730	26.36	4102411	87053119	21.26
0.2362	0.2559	0.2461	3.706	2.392	1073935	109014664	26.62	3995308	91048427	22.23
0.2559	0.2756	0.2657	4.056	2.508	819397.7	109834062	26.82	3466181	94514608	23.08
0.2756	0.2953	0.2854	4.415	2.597	635194.5	110469257	26.97	3121892	97636500	23.84
0.2953	0.3150	0.3051	4.784	2.677	499373	110968630	27.09	2850288	100486788	24.54
0.3150	0.3346	0.3248	5.162	2.586	397550.6	111366180	27.19	3161901	103648688	25.31
0.3346	0.3543	0.3445	5.549	2.428	320077.2	111686257	27.27	3820828	107469517	26.24
0.3543	0.3740	0.3643	5.944	2.423	260339.5	1.12E+08	27.33	3842539	1.11E+08	27.18

Dari tabel 10 terlihat hasil analitis dan numerik memiliki selisih sebesar 0,567%.

Untuk konversi ke dalam satuan tahun dapat dijelaskan seperti berikut.

$$N(\text{tahun}) = N(\text{cycle}) \times T(\text{periode gelombang})$$

$$N(\text{tahun}) = 1.12\text{E}+08 \times 7,7$$

$$N(\text{tahun}) = 8.62\text{E}+08 \text{ sekon}$$

$$N(\text{tahun}) = 27,33 \text{ tahun}$$

#### IV. KESIMPULAN

Dari penelitian tugas akhir ini, dapat diambil kesimpulan antara lain:

1. Nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) terbesar dengan pembebanan maksimum 6,86 MPa√m dan 6,02 MPa√m dengan pembebanan minimum serta nilai ini masih jauh dari besarnya nilai fracture toughness yaitu 182.19 MPa√m yang merupakan nilai SIF kritis, sehingga kondisi tubular joint 502 masih memenuhi dalam kriteria perancangan.
2. Laju perambatan retak terbesar pada tubular joint 502 yaitu 1,59E-10 in/cycle.
3. Perhitungan umur kelelahan yang terjadi pada tubular joint 502 dengan metode *Linear Elastic Fracture Mechanic* adalah 1,12E+08 cycle (27 tahun).

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Djatmiko, E. B. and Murdijanto, 2003, *Seakeeping : Perilaku Bangunan Apung di atas Gelombang*, Surabaya : Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [2] Murdjito, 1996, *Diktat Pengantar Bangunan Lepas Pantai. Kursus Segitiga Biru ITS – Unhas – Unpati*. Surabaya : FTK ITS.
- [3] Barsom, J. M., dan Rolfe, S.T. 1999. *Fracture and Fatigue Control in Structures, Third Edition*. New Jersey: Prentice Hall, Inc.